РОЛЬ ОКЕАНОВ В КОЛЕБАНИЯХ КЛИМАТА АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА В ТЕЧЕНИЕ ГОЛОЦЕНА

Дергачев В.А.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

THE ROLE OF THE OCEANS IN THE ARCTIC REGION'S CLIMATE VARIATIONS DURING THE HOLOCENE

Dergachev V.A.

Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg, Russia

Climatically important parameters of the World Ocean between which there is a relationship are the temperature of the ocean waters and the heat content of the active layer of the ocean, sea currents and ice, salinity and characteristics of the water column. The ocean is in continuous interaction with the atmosphere and the earth's crust, manifested in the exchange of heat, moisture and momentum. In turn, there is also the effect of the atmosphere on the ocean, which manifests itself mainly through the circulation of water. Changes in the state of continental ice and fluctuations in ocean levels are key consequences of climate change in most regions of the world. The main global causes of the impact on climate should be noted: changes in time of the Sun's orbit, solar activity, including solar radiation, volcanic emissions and the greenhouse effect of the planet.

The paper analyzes the role of three oceans (Arctic, Atlantic and Pacific) associated with the Arctic region and the role of ocean currents in the process of inter-latitudinal heat transfer. The results of the analysis of both long-term and short-term variability of the ocean surface temperature are presented, covering various time intervals from the end of the last ice age to the present and the relationship of these changes with the causes that generate them. It is concluded that the natural climate variability in the Arctic region over the studied time interval is significant.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-109-114

1. Введение

Океаны покрывают почти три четверти земной поверхности, представляют собой огромный аккумулятор солнечного тепла и влаги и являются основным регулятором климата. Для формирования и изменения климата особое значение имеет взаимодействие между океаном и атмосферой, связанное с обменом и перераспределением тепла, воды, газов, частиц и количества движения. Температура поверхности океана, солёность, характеристики толщи воды, теплосодержание деятельного слоя океана, морские течения и льды являются климатическими значимыми параметрами для исследования Мирового океана.

Следует отметить, что в последнюю межледниковую эпоху (120–125 тыс. лет назад) уровень океана был выше современного на ~ 10 м [1]. Многие флуктуации климата (до десятков лет) могут быть результатом взаимодействия атмосферы и Мирового Океана, такие как Южное колебание

(Эль-Ниньо), Северо-Атлантические и Арктические осцилляции. На более длительной временной шкале происходит термохалинная циркуляция, вследствие неоднородности распределения температуры и солёности в океане. Термохалинная циркуляция представляет собой крупномасштабную систему течений в океане [2].

Среди основных внешних причин изменений климата критически обсуждаются следующие: изменения орбиты Солнца, солнечная активность и солнечная постоянная и др. Особый интерес представляют флуктуации климата, связанные с изменчивостью солнечного излучения (обусловленные изменением во времени положения орбиты Земли, напр., [3]).

Последствия выбросов антропогенных парниковых газов, которые являются одной из причин наблюдаемого в последнем столетии колебания климата из-за изменения температуры океана и таяния льда, наиболее сильно ощущаются в полярном регионе. Связанные с этими колебаниями климата морские волны тепла вызывают серьёзные изменения в структуре и функциях морских экосистем и влияют на важнейшие виды их основ: кораллы и морские травы [4].

В работе [5] прослежена связь между резкими изменениями температуры в Арктике и изменениями температуры поверхности моря, как в Северной Атлантике, так и в северной части Тихого океана. К сожалению, многие особенности взаимосвязанных процессов в климате Арктики остаются недостаточно изученными, что усложняет построение надёжной картины будущих изменений климата.

2. Изменение климатических параметров

после отступления последнего оледенения и солнечное воздействие

Рассмотрим колебание глобального среднего уровня моря (GMSL) в течение последнего ледниково-межледникового периода, уровень которого определяется как среднее значение площади относительного уровня моря или высоты морской поверхности над Мировым океаном. Глобальная реконструкция температуры для раннего и среднего голоцена (от 9.5 до 5.5 тыс. лет назад), полученная как из морских, так и наземных источников, предполагает, что глобальная средняя поверхностная температура на $0,8^{\circ}\text{C}$ выше, чем доиндустриальные температуры [6]. В работе [7] рассмотрены механизмы, которые управляют пространственной изменчивостью уровня моря в различных временных масштабах, а также источники и статистические методы, применяемые к косвенным и инструментальным данным. На рис. 1а показаны реконструкции глобального среднего уровня моря (GMSL) для голоцена – кривые (1–4), полученные различными авторами (статьи 2004, 2014, 2015 и 2016 гг.), указанными в работе [7].

В настоящее время для исследователей доступна многопараметрическая база данных временных рядов палеотемператур [8], которая охватывает последние 12 тыс. лет, и включает в себя 5 различных статистических

методов для реконструкции температур, что и позволяет проводить более надёжный анализ глобальной средней температуры и связанные с этим неопределённости, чем это было ранее доступно (рис. 1b). На рис. 1b показана медиана ансамблей для реконструкции глобальной средней температуры. Как следует из рис. 1b, в среднем самый тёплый интервал в голоцена приходится на ~ 6,5 тыс. лет назад, когда было теплее примерно на 0,6–0,7 °С, чем в 19 веке. За пиковым теплом следует тенденция похолодания. На рассматриваемом временном интервале (рис. 1c) можно выделить изменение скорости температуры от долей градуса до ~2°С и периодами изменения: 600–400 лет, 400–200 лет, 200 лет.

Рис. 1. Сравнение климатических данных с параметрами, влияющими на климат, на временной шкале последних 12 тыс. лет:

а) Реконструкции глобального среднего уровня моря (GMSL) для голоцена [7] – кривые 1–4, полученные различными авторами; **б)** Многомодовой реконструкции средней глобальной температуры поверхности Земли [8] (1 – штриховая кривая) с предыдущими: 2 – [9], 3 – [10] реконструкциями. Пределы неопределённости (стандартное отклонение) температур многомодового ансамбля ограничены заштрихованной областью; **в)** Реконструкции скорости изменения годовой температуры Арктики (°С на столетие) из ледяной шапки Agassiz Гренландии [11]; **г)** Реконструкции параметров, отражающих солнечное влияние на изменение климата: изменение концентрации ^{14}C (1) в образцах известного возраста [12] и изменение инсоляции (2) [13] в последние 12 тыс. лет.

Рассмотрим, как регистрируемые скорости изменения температуры в Арктике связаны с изменением во времени солнечного влияния (солнечных пятен и солнечного излучения). На рис. 1d приведены данные по концентрации ^{14}C в образцах известного возраста [12], отражающие изменение во времени солнечной активности и изменение солнечного излучения (ин-

соляции) [13], обусловленное орбитальным воздействием на климат. В целом, между данными по солнечному влиянию на климат, в том числе выделяемым периодам как в солнечном воздействии, так и в изменениях температур, прослеживается взаимосвязь.

3. Характер изменения климатических параметров в последние 2000 лет

Проанализируем закономерности изменения климатических параметров и данные по солнечному воздействию на климат в эпоху, наиболее охваченную детальными исследованиями изменений климата. Для того чтобы сделать корректные выводы из прокси данных, важно опираться на точную хронологическую картину исследуемых процессов. Котляков [14], используя радиоуглеродную и календарную датировки прокси данных температуры, получил надёжное указание на понижение температуры с ~6.5 тыс. лет назад (рис. 2а).

Важно также отметить, что уровень климатического оптимума голоцена, отмеченного 5,5 тыс. лет назад, оказался на 1.5°C ниже максимальной температуры предыдущего межледникового, когда никакого антропогенного воздействия на климат на Земле не было. И этот пик уже пройден – в течение последних 5–6 тыс. лет температура в целом продолжает понижаться, и современная эпоха находится на нисходящем отрезке кривой (напр., [15]).

Изучение древних уровней моря даёт представление о механизмах и темпах изменений уровня моря из-за тектонических процессов и климатических изменений (например, инсоляции из-за изменений орбиты Земли).

Рис. 2b представляет орбитальное воздействие (изменение инсоляции, наклонения орбиты и прецессии) на климат в северном полушарии течение голоцена [16]. Солнечная активность в прошлом зафиксирована в данных космогенных изотопов. Циклы различной продолжительности солнечной активности можно проследить в данных содержания радиоуглерода в атмосфере после устранения долговременного тренда (рис. 2с) [17].

Временной ряд глобального среднего уровня моря с 2000 года до н. э. по 2020 год н. э. представлен на рис. 2d [18]. Более темное и более светлое затенение указывают на ошибки в 1σ и 2σ соответственно. Временные ряды GMSL с 2000 года до н. э. по 2020 год н. э.

Реконструированные (измеренные) аномалии температуры относительно 1961–1990 гг. приведены на рис. 2е [19]. Линии представляют 30-летние медианы ансамбля с фильтром нижних частот для отдельных методов реконструкции. Серым цветом выделена область, охватывающая результаты реконструкции из всех семи методов. Черная кривая представляет инструментальные данные за 1850–2017 гг.

Реконструкции поверхностной температуры Арктики по данным прямых измерений, исторических и прокси данных для последних 2000 лет

представлены на рис. 2f (1 – [20], 2 – [21]). Можно видеть различие в температурных шкалах на фактор 2.

Рис. 2. Изменение климатических характеристик и солнечного воздействия на климат на интервале голоцена и в последние 2 тыс. лет:

а) Тренд (прямая линия 3) в изменениях годовой средней температуры после климатического оптимума голоцена (~6.5 тыс. лет назад) [14]. Кривые 1 и 2 показывают календарные (1) и радиоуглеродные (2) датировки исследованных образцов; **б)** Орбитальное воздействие на климат в северном полушарии течение голоцена (инсоляции в июле на 15° с.ш. – 1 и 65° с.ш. – 2; прецессии – 3, наклонения орбиты – 4) [15]; **в)** Вариации содержания радиоуглерода в атмосфере после устранения долговременного тренда [17]; **г)** Глобальный средний уровень моря (GMSL) с 2000 года до н. э. по 2020 год н. э. [18]. Пунктирные линии толстые и тонкие указывают на пределы ошибок в 1 и 2 сигмы, соответственно, в статистических оценках уровня моря; **е)** Реконструированная/измеренная глобальная температура за 2000 лет [19]. Ноль соответствует среднему значению температуры в интервале 1961–1990 гг.; **ф)** Поверхностная температура Арктики (1 – [20], 2 – [21]); **г)** Глобальная поверхностная температура атмосферы [22]; **h** - Глобальная морская поверхностная температура [23].

На рис. 2g приведены значения глобальных поверхностных температур атмосферы [22], а на рис. 2h – усредненные по 200-летним интервалам значения глобальной морской поверхностной температуры [23]. Глобальная реконструкция температуры океана показывает тренд похолодания в течение последнего тысячелетия, исключая последние десятилетия.

Выводы

Исследование изменений глобального климата является одной из важнейших научных и практических проблем, Океаны являются системой жизнеобеспечения Земли, они регулируют глобальный климат, определяют температуру и управляют погодой, определяя количество осадков, засухи и наводнения и откликаются на солнечное воздействие.

Литература

1. Котляков В.М. Криосфера и жизнь // Экология и жизнь. № 11. С.51-60. 2010.
2. Дуанский Н.А., Багатинский В.А. // Известия Российской Академии Наук. Физика атмосферы и океана. Т. 55. № 6. С. 157-170. 2019.
3. Фёдоров В.М., Гребенников П.Б., Фролов Д.М. // Арктика и Антарктика. № 2. С. 17-33. 2020.
4. Hughes T.P., Kerry J.T., Baird A.H. et al. // Nature. V. 556. P. 492–496. 2018.
5. Praetorius S., Rugenstein M., Persad G., et al. // Nature Communications. 9 (1). 324. 2018.
6. Marcott S.A., Shakun J.D., Clark .P.U., Mix A.C. // Science. 339(6124). P.1198–1201. 2013.
7. Horton B.P. Kopp R.E., Garner A.J., et al. // Annu. Rev. Environ. Resour. 43:481–521. 2018.
8. Kaufman D., McKay N., Routson C. et al. // Scientific Data. 7: 201. 2020.
9. Shakun, J. D., Peter U., Clark P.U., He F., et al. // Nature. 484. P. 49–54. 2012.
10. Marcott S.A., Mix A.C., Liu Z. // Nature. 484 P. 49–54 2012.
11. Lecavalier B.S., Fisher D.A., Milne G.A. et al. // PNAS. V. 114 (23). P. 5952–5957. 2017.
12. Stuiver M., Reimer P.J., Bard E. et al. // Radiocarbon. 40. P. 1041-1083. 1998.
13. Berger A. // J. Atmos. Sci. 35. P. 2362-2367. 1978.
14. Kotlyakov V.M. // Soln.-Zemnaya Fiz. No. 21. P. 110–114. 2012.
15. Dergachev V.A. // Geomagn. Aeron., V. 59, 7. P. 918-925. 2019.
16. Berger A. and Loutre M. F. // Quaternary Science Reviews. 10. P. 297–317. 1991.
17. Stuiver M. and Braziunas T. F. // Radiocarbon. 35. P. 137-189. 1993.
18. Miller K.G., Schmelz W.J., Browning J.V. et al. // Oceanography 33(2). P. 32–41. 2020.
19. PAGES 2k Consortium // Nature Geoscience. V. 12. P. 643–649. 2019.
20. Kaufman D.S., Schneider D.P. et al. // Science V. 325(5945). P. 1236-1239. 2009.
21. PAGES 2k Consortium // Nature Geoscience. V. 6, P 339–346. 2013.
22. Lüdecke H.-J. and Weiss C.-O. // Open Atmos. Sci. J. V. 11. P. 1874–2823. 2017.
23. McGregor H.V. Evans M.N., Goose H. et al. // Nature Geoscience. V. 8. P. 671-677. 2015.